

抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施

赵 杰¹, 黎小林¹, 吕金壮¹, 曾 嵘², 牛 犇²

(1. 南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510623; 2. 清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 高压直流输电系统单极大地回线方式运行时, 巨大的入地电流将会使接地极附近的变电站主变压器产生直流偏磁, 对交流系统造成不利影响。文中论证了在变压器中性点串接电阻器限制地中直流流入的可行性, 并从抑制中性点直流与过电压效果和继电保护角度分析及校核了中性点电阻器对系统造成的影响。研究表明, 这是一种简单有效的抑制变压器中性点直流电流的措施。

关键词: 高压直流输电; 直流偏磁; 中性点串联电阻器; 过电压; 继电保护

中图分类号: TM721.1; TM86

0 引言

高压直流(HVDC)输电系统在我国正得到越来越广泛的应用。为了实现远距离或超远距离大容量送电, 将有更多高压甚至特高压直流工程建成并投入运行^[1]。交直流混合运行的电网结构使得交直流系统之间的相互影响越加明显, 对南方电网而言尤为突出^[2-4]。HVDC 系统运行时不可避免地面临单极大地回线运行的方式。当巨大的直流电流从接地极入地, 对附近的交流系统、尤其是交流变压器产生较大影响^[5]。其原因在于: 直流经接地极流入大地后, 部分通过中性点流经变压器, 形成直流偏磁, 使得变压器噪声增加、发热、振动等。以贵广 I 回直流工程调试为例, 当直流系统从金属回线转换到大地回线方式时, 接地极临近变电站的主变中性点电流直流分量大都上升, 主变噪声也有不同程度的增大。其中较严重的春城站, 中性点直流分量达 34.50 A, 主变噪声接近 94 dB。

直流入地电流对接地极临近的交流系统的不利影响, 已构成一项重要的技术挑战。它直接影响已建工程接地极附近交流系统的安全稳定运行, 也使得待建直流工程接地极的选址工作需要更审慎地进行。珠三角地区直流落点密集, 为克服接地极选址困难的困境, 即将开工建设的贵广 II 回高压直流工程将与云广特高压直流工程共用接地极。因此, 共接地极后对极址周围交流电力变压器的影响及妥善解决显得尤为关键。

直流偏磁问题在 20 世纪 80 年代后期开始引起国内外研究者的重视并陆续开展了相关研究^[6-7]。有关的抑制措施^[8]如中性点加电容器隔直, 中性点加装电阻器或反向电流注入^[9]也曾有工程应用。然

而, 截至目前, 工程应用中仍未有简单、实用、可靠的解决方案, 也没有长期可靠的运行经验做支撑。

在前期理论研究和实测的基础上, 本文提出了中性点串接小电阻的参数选择方法和实施方案。利用场(地中电流场分布)路(交流系统集总的电路参数)耦合分析方法, 将周边交流系统数据纳入计算模型, 通过适当选择小电阻取值和合理优化小电阻安装位置, 完全可在工程可接受的范围内解决问题。根据研究结果, 小电阻装置现已研制完毕并通过了型式试验和出厂试验, 装置已运抵春城站现场, 并于 2005 年底挂网试运行。

本文以春城站为例从抑制中性点直流的效果、对系统过电压的影响、对系统继电保护的影响等 3 方面对串接电阻器方案进行分析。

1 电阻器限制地中直流电流效果分析

中性点串接电阻器方案抑制变压器中性点直流电流的原理如图 1 所示, 把变电站 A、B 之间的情况用集总参数来表示。串接电阻器等于增大了地上支路的电阻, 电流势必更多地流经大地土壤支路, 从而达到了限制地中电流进入交流系统的目的。

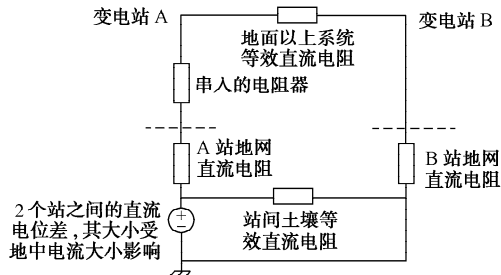


图 1 中性点串接电阻器限制地中电流流入原理
Fig. 1 Schematic diagram of series neutral resistor to restrain DC ground current

由于无法完全模拟实际情况,模拟计算春城站中性点串入不同阻值电阻器之后各个站的中性点直流电流的具体数值与实测值存在误差,但是计算结果的总体趋势是可供参考的。当电阻阻值分别为 $0\ \Omega$ 、 $2\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 时,中性点直流电流对应为 $22.30\ \text{A}$ 、 $14.60\ \text{A}$ 、 $10.90\ \text{A}$ 、 $6.15\ \text{A}$ 和 $3.57\ \text{A}$ 。可见,串入阻值很小的电阻即可明显降低中性点电流。

2 电阻器对系统过电压的影响分析

主变压器中性点串接电阻器后,对于过电压的影响主要包括雷电过电压、工频过电压和操作过电压 3 个方面。

2.1 雷电过电压

雷电过电压的影响主要通过雷电侵入波施加。雷电波通过传输线侵入变压器后从中性点流入电网,从而在中性点电阻器上建立起暂态过电压。

雷电侵入波的问题用波过程原理来分析,如图 2 所示。

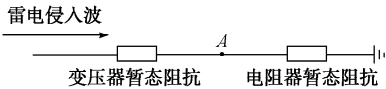


图 2 雷电侵入波通过中性点的波过程

Fig. 2 Schematic diagram of lightning break-in wave through transformer neutral point

雷电侵入波从变压器传播到电阻器时会在 A 点发生折反射,进入电阻器的是折射波。折射波与侵入波的关系与变压器和电阻器的暂态阻抗比值密切相关。因为电阻器暂态阻抗很小($<10\ \Omega$),而变压器暂态阻抗较大(通常可达前者的数十倍至上百倍),因此实际上折射波很小,一般不会使得中性点电位提高很多。仿真计算结果也显示了这一点。

仿真计算模型包括 3 个杆塔。考虑最极端的情况,雷击变电站外的最后一级杆塔,雷电波向两侧传播。一侧的侵入波通过导体传播到变电站内的杆塔,再传播到变压器;另一侧通过不发生反射的长线传播到远方。这种模型考虑的是侵入波的雷击点距离变电站最近的情况,是侵入波最严重的情况。

计算中考虑到最大的雷电流幅值为 $115\ \text{kA}$,变电站站网冲击接地电阻、避雷器冲击接地电阻和杆塔冲击接地电阻也分别取不同的阻值。综合各种情况,变压器中性点电位的提升并不显著,最大不超过 $1\ \text{kV}$,这和定性分析的结果是一致的。

2.2 工频过电压

工频过电压的校核在春城变电站进行。当该变电站附近发生单相短路接地故障时,记录春城站母线上出现的过电压以及春城站主变中性点的过电

压,通过校核确定母线工频过电压是否超过标准,以及主变中性点的电位升高值。

校核计算时,因为春城变电站只与河东、恩平 2 个变电站相连,所以根据潮流数据将河东变电站及其不和春城相连的部分等效为一个有零序阻抗的电源,把恩平变电站及其不和春城相连的部分等效为另一个有零序阻抗的电源,把春城变电站所有的低电压等级出线等效成三相负载,其接线见图 3。

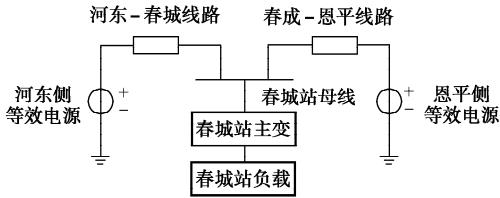


图 3 校核计算原理

Fig. 3 Schematic diagram of calculation

考虑故障发生的位置,分 3 种极端情况:在 2 端和在中间分别计算春城站母线和中性点的过电压。具体结果见表 1。

表 1 单相接地故障时春城站母线和中性点过电压
Table 1 Over-voltages at bus bar and neutral point of Chuncheng substation while single phase failure

故障点	A 相	B 相	C 相	中性点暂态过电压/V	中性点工频过电压/V
远端	0.92	0.97	0.055	1 367	785
中点	0.93	0.97	0.440	2 448	1 370
近端	0.92	0.96	0.200	4 409	2 520

注:三相母线电压取标么值;中性点暂态电压取峰值,中性点工频电压取有效值。

观察表 1 中数据,不难发现:

1)故障发生后,中性点的工频过电压很大,会有几 kA 的工频电流流过,会产生较大的热功率,因此需要校核中性点电阻的热容量。

2)通过对 2 条线路各自选取的 3 个故障点进行对比发现,工频暂态过电压都在正常范围之内,而春城站主变中性点电压则随着故障点向春城站靠近有明显增大,且幅值较大。

把串接不同阻值的电阻和没有串电阻时的结果相比,以不串接电阻时的电压为基值,则可以得到相对值,见表 2。

表 2 串接小电阻前后的对比
Table 2 Comparison between the conditions with or without series neutral resistor

母线相别	串接电阻的过电压			
	$0\ \Omega$	$1\ \Omega$	$2\ \Omega$	$5\ \Omega$
A 相	1.000	0.986 8	0.974 9	0.947 0
B 相	1.000	1.016 6	1.033 1	1.080 1
C 相	1.000	0.995 9	0.991 4	0.973 6

可见,串接 1 Ω 小电阻,母线过电压变化不超过 2%;串接 2 Ω 小电阻,母线过电压变化不超过 4%;串接 5 Ω 小电阻,母线过电压变化不超过 9%。但是,由于主变中性点有较为明显的工频电压升高,使得较大的工频电流流过电阻器,因此可选择热容量较大的电阻器,同时采用并联保护措施。

2.3 操作过电压

操作过电压校核的目的主要是考察春城站中性点串接电阻后,对系统操作过电压的影响。校核计算时的等效接线方式和工频过电压计算时相同。为了便于对比,仍以不串接电阻时的结果为基值,给出相对值。3 种操作过电压计算的结果比较如表 3 及表 4 所示。

表 3 空载线路合闸过电压对比结果
Table 3 Calculation results of over-voltage of the switching open line

系统侧	不串接电阻时的过电压	串接电阻时的过电压	
		1 Ω	5 Ω
河东侧	1.000	1.000 0	1.000 1
春城站母线	1.000	1.000 1	1.000 1
恩平侧	1.000	1.000 0	1.000 0

表 4 单相及三相重合闸过电压对比结果
Table 4 Calculation results of over-voltage of the single phase and the three phase reclosing

串接电阻措施	单相重合闸过电压			三相重合闸过电压	
	健全相	故障相	健全相相间	健全相	故障相
不串接电阻	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
串接 1 Ω 电阻	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00
串接 5 Ω 电阻	1.06	0.99	1.00	1.00	1.00

综观上述计算结果,春城站主变中性点接入 1 Ω 或 5 Ω 小电阻后,系统操作过电压与原来不串接电阻时相比变化很小。因此,在工程范围内可以认为,春城站主变中性点接入电阻对系统操作过电压基本没有影响。

3 对系统继电保护的影响分析

继电保护系统是电力系统安全运行的重要保障。中性点串接电阻器之后,改变了系统的部分参数,对于继电保护可能会产生影响。因此,这方面也需要认真校核。

目前我国 220 kV 以上输电线路通常装设 2 套原理不同的全线速动纵联保护。中性点串接电阻器相对线路而言相当于改变了外部元件参数,对于差动保护的测量没有影响;中性点串接电阻器相对于零序方向元件有一定的影响,主要是零序方向动作最灵敏角度发生偏移,因接入电阻值较小,在母线故障最严重情况下,角度偏移一般不超过 20°,仍在零

序方向可靠动作区内,不影响方向比较式保护的正确动作。因此,个别的中性点串接电阻器对于线路主保护没有实质性影响。

线路后备保护通常采用零序电流保护或距离保护。零序电流保护受中性点接地状况的影响较为明显。中性点串接电阻器,实际上是改变了零序网的阻抗数值。由于串接电阻的阻值不大,所以零序阻抗和零序电流的改变不大,只需整定计算校检时注意。以春城变电站为例,考虑中性点工频电流最严重的情况,即春城站母线处发生单相接地故障时,中性点接入 10 Ω 电阻的情况下,线路零序电流幅值从 2.9 kA 降到 2.7 kA,相对差值小于 10%,在可承受的范围内。

距离保护的主要元件可以分为相间阻抗继电器和接地阻抗继电器。中性点串接小电阻不会改变三相短路和两相短路的序网参数,因此,串接小电阻不会对相间距离保护产生影响。

当接地阻抗继电器在整定其启动阻抗时,中性点的电阻没有被纳入回路,因而对于启动阻抗整定没有影响。当不对称故障(例如单相直接接地)发生时,有电流流过中性点,使得电阻器也被纳入零序网,实际的故障电流减小,致使实际测得的阻抗大于整定阻抗。可以在实际整定过程中考虑到中性点电阻的因素,将其阻值折算到各相阻抗。

4 结语

1)采用中性点串接电阻方案限制流经变压器中性点的直流电流具有简单、实用、可靠的特点,是解决变压器直流偏磁问题的一项有效措施。

2)中性点电阻器改变了交流系统的零序阻抗,为系统安全可靠起见,使用时应针对具体情况考虑保护配置的整定值。

3)计算结果表明,在春城站主变中性点串接阻值较小(10 Ω 以下)的电阻器,可以有效地限制经主变中性点流入的地中直流电流,春城站主变中性点串入适当的电阻后对系统过电压产生的影响很小,不会给系统带来危害。

参考文献

[1] LI Licheng. Technical characteristics and engineering application of UHVDC power transmission// Proceedings of the 14th International Symposium on High Voltage Engineering, Aug 25-29, 2005, Beijing, China. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2005: 25-29.

[2] 杨卫东,薛禹胜,荆勇,等.南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援.电力系统自动化,2003,27(17):68-72.

YANG Weidong, XUE Yusheng, JING Yong, et al.

- Emergency DC power support to AC power system in the south China power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(17): 68-72.
- [3] 杨卫东,薛禹胜,荆勇,等. 直流系统的控制策略对南方电网暂态稳定性的影响. *电力系统自动化*, 2003, 27(18): 57-60.
YANG Weidong, XUE Yusheng, JING Yong, et al. Influence of DC system's control strategy on the transient stability of south China power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(18): 57-60.
- [4] 毛晓明,张尧,管霖,等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略. *电力系统自动化*, 2005, 29(20): 55-59.
MAO Xiaoming, ZHANG Yao, GUAN Lin, et al. Research on coordinated control strategy for inter-area oscillations in China southern AC/DC power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(20): 55-59.
- [5] 钟连宏,陆培均,仇志成,等. 直流感地极电流对中性点直接接地变压器影响. *高电压技术*, 2003, 29(8): 12-13.
ZHONG Lianhong, LU Peijun, QIU Zhicheng, et al. The influence of current of DC earthing electrode on directly grounded transformer. *High Voltage Engineering*, 2003, 29(8): 12-13.
- [6] MELIOPOULOS A P S, CHRISTOFORIDIS G. Effects of DC ground electrode on converter transformers. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1989, 4(2): 995-1002.
- [7] KAPPENMAN J G, NORR S R, SWEEZY G A, et al. GIC mitigation: a neutral blocking/bypass device to prevent the flow of GIC in power systems. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1991, 6(3): 1271-1281.
- [8] 朱艺颖,蒋卫平,曾昭华,等. 抑制变压器中性点直流电流侧措施研究. *中国电机工程学报*, 2005, 25(13): 1-7.
ZHU Yiying, JIANG Weiping, ZENG Zhaozhua, et al. Studying on measures of restraining DC current through transformer neutrals. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(13): 1-7.
- [9] 蒯狄正,万达,邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理. *电力系统自动化*, 2005, 29(2): 81-82.
KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(2): 81-82.

赵 杰(1961—),男,硕士,高级工程师,从事交直流电力系统技术研究与管理。E-mail: zhaojie@csg.cn

黎小林(1963—),男,硕士,高级工程师,从事直流输电和 FACTS 方面的研究。

吕金壮(1974—),男,博士,从事高压直流输电技术的研究。

Applying Series Resistor to Restrain Power Transformer DC Biasing

ZHAO Jie¹, LI Xiaolin¹, LÜ Jinzhuang¹, ZENG Rong², NIU Ben²

(1. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The enormous ground return current caused by HVDC (high voltage direct current) system's mono-pole ground return operation mode will result in the main transformer DC biasing at the substations near the ground electrode, thus it has disadvantageous effect on AC (alternative current) system. This paper introduces the measure by using a series neutral resistor to restrain the DC ground current into the transformer. Also, the effects of the application on restraining the neutral current, AC system over-voltage and relay protection are analyzed and checked out. The measure is then proved effective to restrain power transformer DC biasing with analysis result.

Key words: HVDC transmission; DC biasing; series neutral resistor; over-voltage; relay protection